

водит к пропорциональному увеличению электромагнитного момента и мощности. Отличие же коммутации от нейтральной ($\gamma_0 > \pi/2$) при неизменном значении γ_0 способствует дальнейше-

му улучшению показателей и характеристик электрической машины вследствие более благоприятного фазового взаимодействия электромагнитных полей якоря и индуктора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толвинский В.А. Электрические машины постоянного тока. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 468 с.
2. Троицкий В.А. Магнитодиэлектрики в конструкции электрических машин. – Ташкент: Наука УзССР, 1965. – 209 с.
3. Троицкий В.А., Ролик А.И., Яковлев А.И. Магнитодиэлектрики в силовой электротехнике. – Киев: Техника, 1983. – 207 с.
4. Магнитное поле и ЭДС малоинерционных магнитоэлектрических машин / Е.Г. Коков, А.С. Жибинов, Э.Р. Гейнц, Г.С. Цехмestрюк // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 158–161.

Поступила 09.01.2013 г.

УДК 62-83-523

ПРИНЦИПЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ОСНОВЕ РЕЗЕРВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Г.И. Однокопылов, В.Г. Букреев, А.Д. Брагин

Томский политехнический университет
E-mail: OGIZ@yandex.ru

Рассмотрены принципы обеспечения живучести асинхронного электропривода с частотным преобразователем и резервным полумостом с устранением отказов силовых ключей. Приведены результаты моделирования процессов в электроприводе с алгоритмами восстановления работоспособности при переключении структуры преобразователя. Выполнена оценка эффективности алгоритмов восстановления работоспособности без отключения и с отключением фазных токов асинхронного двигателя.

Ключевые слова:

Живучесть асинхронного электропривода, отказ элементов преобразователя частоты, резервирование элементов электропривода.

Key words:

Fault-tolerant induction motor drive, faults of the inverter, backup of the electric drive.

Аварийное состояние исполнительных электроприводов (ЭП) промышленных объектов опасных производств может привести к нарушению безопасной эксплуатации оборудования и значительным экономическим потерям в ядерной, военной, химической, строительной, металлургической и транспортной отраслях.

Свойство объекта или системы сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов определяется термином «живучесть». Для вышеперечисленных областей применения асинхронного двигателя (АД) задача обеспечения свойства живучести становится определяющей. Из теории живучести технических систем известно, что свойством живучести обладают только избыточные системы, а избыточность в технических системах достигается через резервирование. Различают пять видов резервирования: структурное, функциональное, информационное, нагрузочное и временное, которые могут быть применены в электроприводе отдельно или в определенных комбинациях.

Известные устройства и способы обеспечения живучести ЭП переменного тока на основе АД рассмотрены в работе [1]. Построение асинхронного электропривода с обеспечением свойства живучести рассмотрено в работах [2, 3] для случая формирования избыточности АД с применением функционального резервирования за счет формирования кругового вращающегося поля в аварийном двухфазном режиме трехфазного двигателя. Такой подход позволяет обеспечить живучесть без дополнительных аппаратных затрат, однако он ограничен в применении, так как не позволяет полностью восстановить работоспособность электропривода во всем диапазоне нагрузок и частот вращения.

В статье предложен способ обеспечения свойства живучести АД за счет микроконтроллерного управления электроприводом с реализацией алгоритма восстановления работоспособности на основе резервных элементов, позволяющий полностью восстановить работоспособность ЭП, выполненного по схеме со связанными и развязанными фазами двигателя (с независимым формированием фазных токов преобразователя частоты), при вне-

запных отказах преобразователя частоты типа «невключение ключа» или «невывключение ключа».

Заданный уровень живучести в частотно-регулируемом трехфазном асинхронном ЭП может быть достигнут при выполнении следующих необходимых и достаточных условий в случае аварийной ситуации в одной из фаз преобразователя частоты:

- живучесть электропривода может быть обеспечена за счет структурного резервирования – формирования избыточности динамического холодного резерва, подключаемого к преобразователю частоты при выявлении отказа в одной из фаз;
- электропривод строится на основе управляющего микроконтроллера с использованием информационного резервирования – избыточности процессорного ресурса. Работа микроконтроллера осуществляется с постоянным программным циклом на частоте не ниже частоты ШИМ модуляции силового преобразователя. В результате программного анализа фазных токов вырабатывается один из трех битов отказа: прямых a, b, c и инверсных $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$;
- силовой преобразователь электропривода выполняется на основе трех преобразовательных ячеек по мостовой или полумостовой схеме с необходимой величиной нагрузочного резервирования. Отказавший полумост преобразователя частоты блокируется информационно по сигналам управления и энергетически – с помощью защитных элементов, разрывающих цепь питания преобразователя частоты в звене постоянного тока, или с помощью защитных элементов, подключенных последовательно с обмоткой статора в звене переменного тока с помощью соответствующего бита отказа $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$. Резервный полумост подключается битом отказа соответствующим полностью управляемым ключом с двухсторонней проводимостью. С целью уменьшения времени переключения структуры электропривода T_{Π} необходимо обеспечивать максимальную скорость нарастания формируемых фазных токов (обеспечивать минимальное падение напряжения на ключах, и широтно-импульсное регулирование тока осуществлять, используя только индуктивность обмоток двигателя);
- микроконтроллер формирует задания на фазные токи I_A, I_B, I_C , при этом ток резервного полумоста I_p по управляющему сигналу отказавшей фазы совместно с рабочими полумостами преобразователя частоты формируется по выражениям (1):

$$\begin{cases} I_A = I_{\omega} \bar{d}_{\Pi} \bar{a} \sin \omega t; \\ I_B = I_{\omega} \bar{d}_{\Pi} \bar{b} \sin(\omega t + 2\pi / 3); \\ I_C = I_{\omega} \bar{d}_{\Pi} \bar{c} \sin(\omega t + 4\pi / 3); \\ I_p = I_{\omega} \bar{d}_{\Pi} \left(a \sin \omega t + b \sin(\omega t + 2\pi / 3) + c \sin(\omega t + 4\pi / 3) \right), \end{cases} \quad (1)$$

где I_{ω} – значение амплитуды формируемых фазных токов, А; $a=1, \bar{a}=0; b=1, \bar{b}=0; c=1, \bar{c}=0$ – есть отказ соответствующей фазы преобразователя частоты; $\bar{d}_{\Pi}=0$ – есть отказ в одной из фаз преобразователя частоты, d_{Π} – бит отказа, вычисляемый по логическому выражению $d_{\Pi}=a \cup b \cup c$ (\cup – логическая операция ИЛИ) и длительностью равный времени переключения структуры электропривода T_{Π} ; ω – угловая частота тока статора, рад/с; t – метки времени, с. Сомножитель $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$ в случае отказа обеспечивает запрет подачи управления в отказавший полумост преобразователя частоты в выражениях для I_A, I_B, I_C , а сомножитель \bar{d}_{Π} – обнуляет управляющие сигналы I_A, I_B, I_C, I_p и формирует бестоковую паузу на время срабатывания защитных элементов и подключения резервного полумоста преобразователя частоты;

- временной резерв электропривода позволяет использовать фильтрующие свойства запасенной энергии маховых масс электропривода для снижения величины провала частоты вращения.

Рассмотрим процесс обеспечения живучести трехфазного асинхронного электропривода на основе резервных элементов для случая расположения защитных элементов в звене постоянного тока. В этом случае защитные элементы располагаются в верхнем и нижнем плечах моста каждого из шести ключей преобразователя частоты, состоящего из трех преобразовательных ячеек. Защитные элементы состоят из плавкой вставки и соответствующего коротящего тиристора, управляемого микроконтроллером ЭП.

Резервный полумост подключается через соответствующий ключ с двухсторонней проводимостью к отказавшей преобразовательной ячейке для замещения. В результате при отказе в одной из фаз преобразователя частоты происходит подключение резервного полумоста с токовой или бестоковой паузой на время подключения T_{Π} .

Фазные обмотки статора двигателя запитываются от трехфазного преобразователя частоты, работающего в режиме источника тока. Регулирование фазных токов обеспечивается заданием на токи I_A, I_B, I_C программно в микроконтроллере по выражению (1). На основе анализа фазных токов двигателя на каждом интервале широтно-импульсной модуляции в случае обнаружения отказа в одной из фаз двигателя формируется один из трех битов отказа a, b, c соответствующей фазы двигателя.

Анализ фазных токов осуществляется по выражениям:

- если $|I_{3A} - I_{ocA}| \geq \delta$, то выявляется отказ фазы А, $a=1, \bar{a}=0$;
- если $|I_{3B} - I_{ocB}| \geq \delta$, то выявляется отказ фазы В, $b=1, \bar{b}=0$;
- если $|I_{3C} - I_{ocC}| \geq \delta$, то выявляется отказ фазы С, $c=1, \bar{c}=0$,

где I_{3A}, I_{3B}, I_{3C} – значения заданной мгновенной амплитуды формируемых фазных токов, А; $I_{ocA}, I_{ocB}, I_{ocC}$ – значения мгновенной амплитуды фазных токов с выходов датчиков тока, А; δ – допустимая ошибка работы регулятора тока.

При наличии отказа в одной из фаз блокируется соответствующим битом отказа a – b – c –отказавшая преобразовательная ячейка от цепей питания за счет принудительного формирования величины тока через защитный элемент:

$$I_s \geq k_{pm} k_s I_m,$$

где I_s – амплитуда тока протекающего через защитный элемент и обеспечивающего разрыв цепи, А; k_{pm} – коэффициент кратности пускового тока двигателя; k_s – коэффициент кратности тока защитного элемента; I_m – значение амплитуды тока в фазной обмотке статора, А.

Для проверки предложенного способа повышения живучести АД была разработана имитационная модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода в среде Matlab Simulink [4]. Для моделирования был выбран двигатель МТФ 311-6. Модель электропривода включает в себя: блок задания амплитуды и фазового сдвига векторов тока,

блок регулятора тока, асинхронный двигатель, блок управления и формирования сигнала обрыва фазы, измерительный блок, с помощью которого снимаются показания токов статора и ротора, электромагнитный момент и частота вращения вала АД.

На рис. 1–3 приведены временные диаграммы переходных процессов в ЭП при отказе в одной из фаз преобразователя частоты для номинальных значений частоты вращения и электромагнитного момента. На рисунках обозначено: 2ф/3ф – сигнал выявленного отказа одной из фаз преобразователя частоты (лог. 0 – есть отказ), I_A , I_B , I_C – фазные токи двигателя (А), M – момент двигателя (Н·м), ω – частота вращения (рад/с).

Определяющим параметром применения предложенного способа обеспечения живучести является время переключения структуры электропривода T_n АД при возникновении аварийной ситуации,

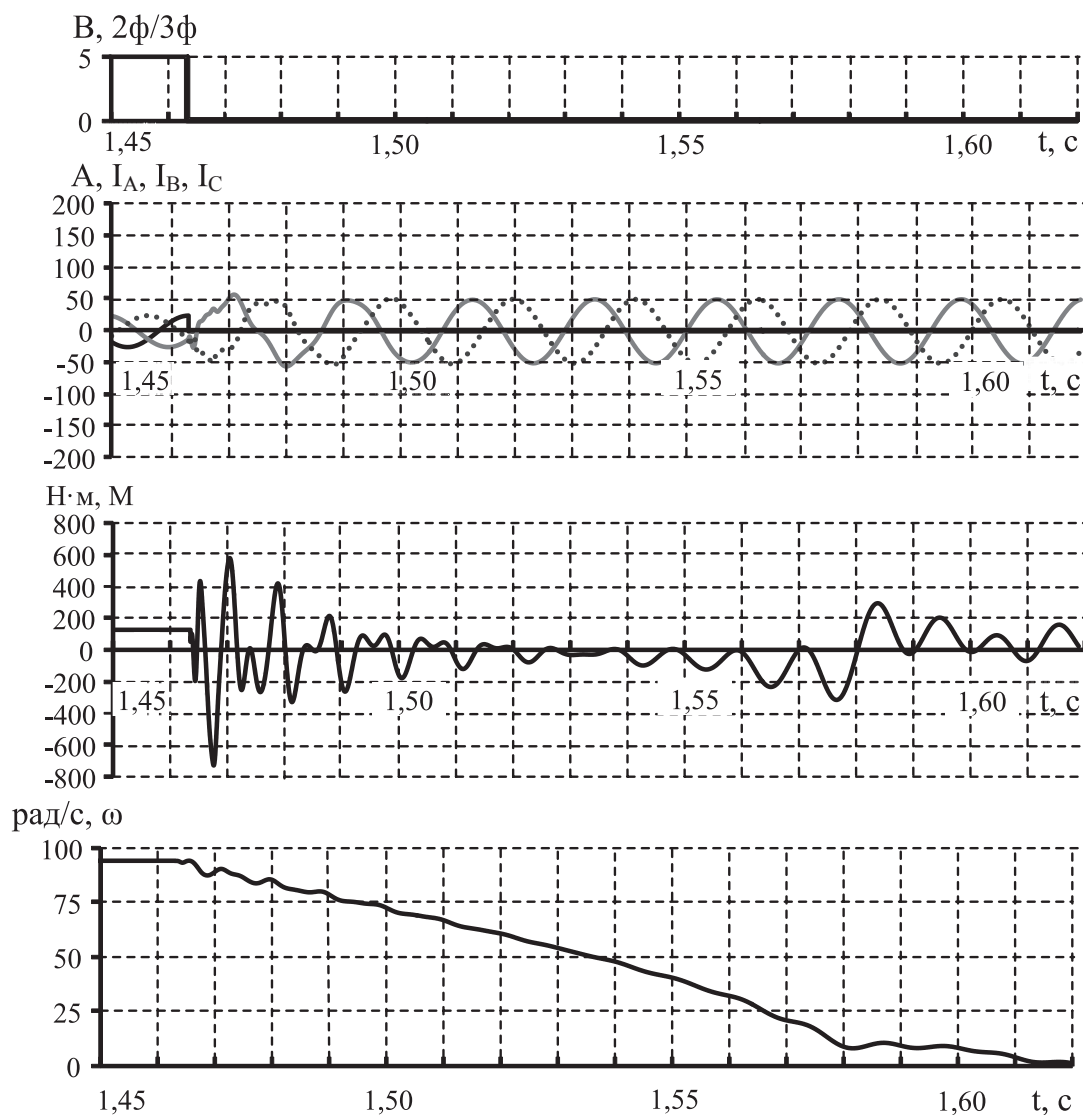


Рис. 1. Временные диаграммы переходных процессов в электроприводе при отказе в одной из фаз преобразователя частоты без восстановления работоспособности

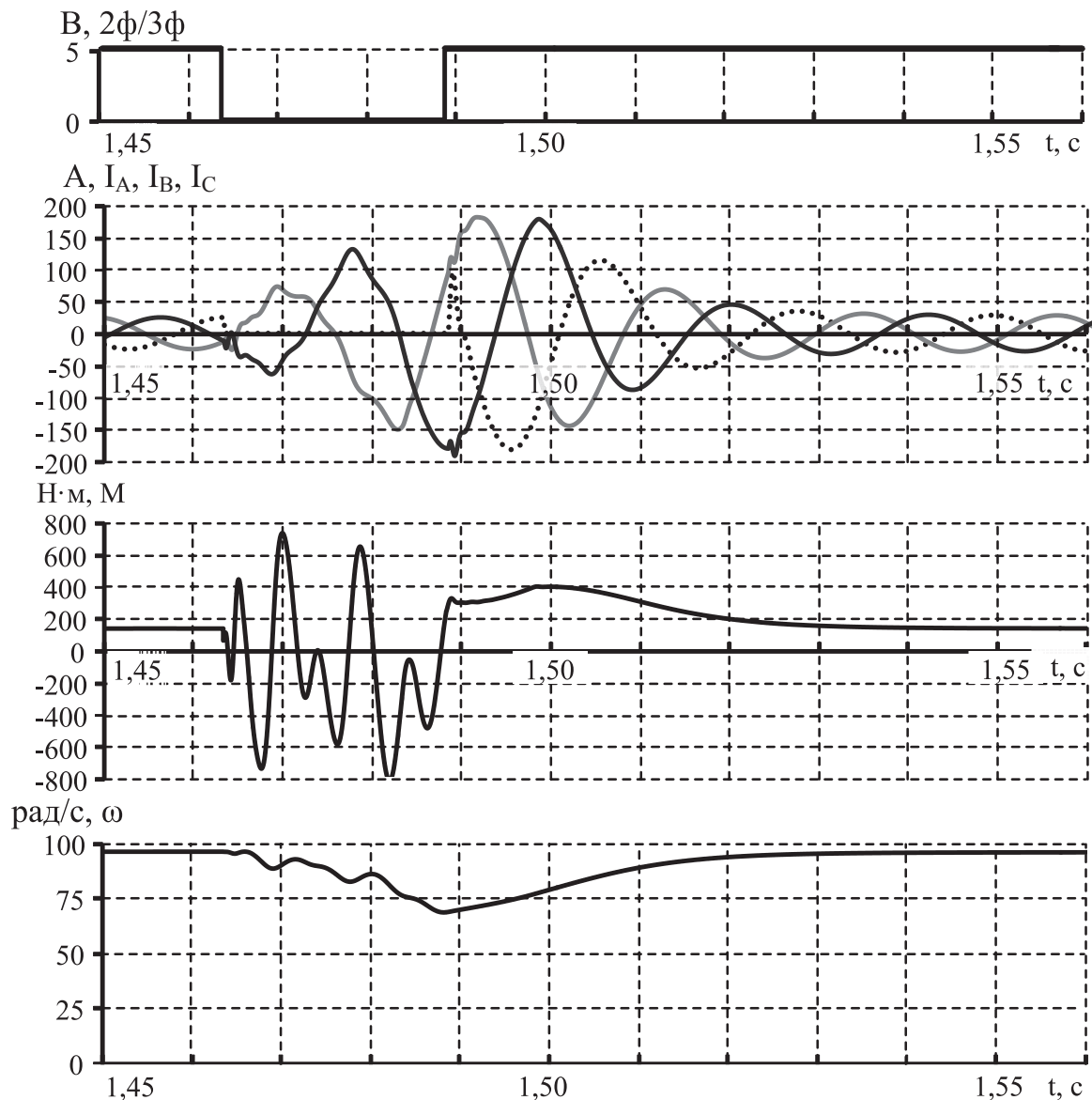


Рис. 2. Временные диаграммы переходных процессов в электроприводе при отказе в одной из фаз преобразователя частоты с восстановлением работоспособности и подключением резервного полумоста

определяющее неуправляемую стадию процесса переключения структуры электропривода, в течение которой возрастают пульсации момента и происходит провал в частоте вращения.

На рис. 1 при отказе в одной из фаз преобразователя частоты восстановления работоспособности не происходит, двигатель останавливается. На рис. 2 при отказе в одной из фаз преобразователя частоты происходит подключение резервного полумоста с полным восстановлением работоспособности. На рис. 3 при отказе в одной из фаз преобразователя частоты также происходит подключение резервного полумоста, но с бестоковой паузой на время подключения T_{Π} .

Из сравнения диаграмм рис. 2, 3 видно, что реализация бестоковой паузы на время подключения

T_{Π} позволяет исключить знакопеременный тормозной момент во время бестоковой паузы, что приводит к последующему снижению в 3 раза значения момента, необходимого для восстановления рабочих характеристик двигателя, также в 1,66 раза снижается провал частоты вращения.

Выводы

1. На основе разработанной имитационной модели в среде Matlab Simulink показан процесс полного восстановления работоспособности электропривода для электродвигателя с независимым формированием фазных токов преобразователя частоты в случае отсутствия напряжения в аварийной фазе с временем подключения резервного полумоста $T_{\Pi}=25$ мс.

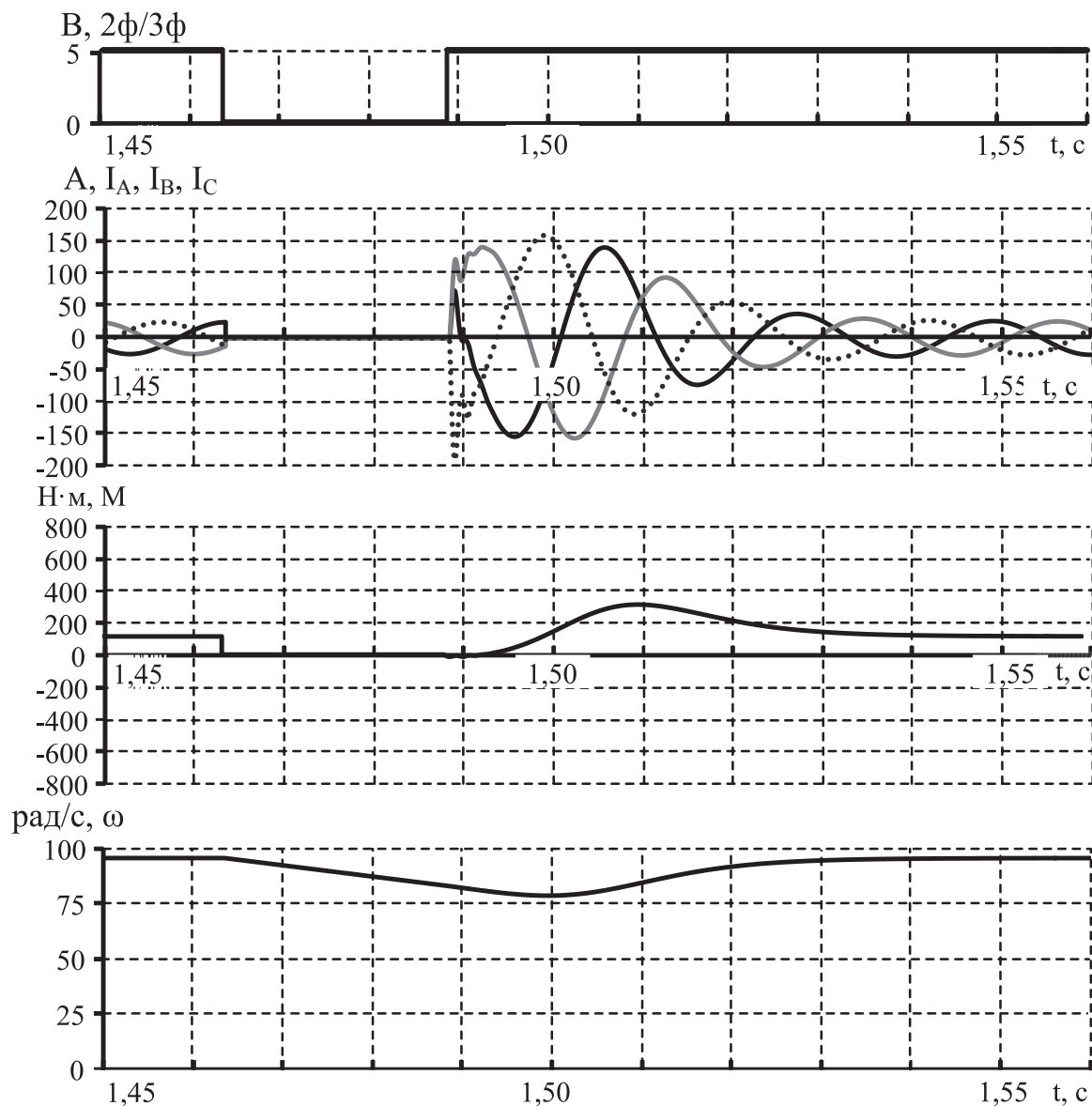


Рис. 3. Временные диаграммы переходных процессов в электроприводе при отказе в одной из фаз преобразователя частоты с восстановлением работоспособности и бестоковой паузой при подключении резервного полумоста

- В результате сравнительного анализа установлено, что для обеспечения живучести асинхронного электропривода с независимым формированием фазных токов преобразователя частоты при отказе в одной из фаз более предпочтительно применение бестоковой паузы по сравнению

с неотключаемыми фазными токами в процессе подключения резервного полумоста, что позволяет в 1,66 раза снизить провал частоты вращения и в 3 раза — амплитуду пульсаций электромагнитного момента для времени подключения резервного полумоста $T_n=25$ мс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Однокопылов Г.И., Однокопылов И.Г. Обеспечение живучести электродвигателей переменного тока: Монография. — Томск: Изд-во ТПУ, 2005. — 187 с.
- Однокопылов Г.И., Образцов К.В., Однокопылов И.Г. Принципы обеспечения «живучести» электроприводов переменного тока // Электричество. — 2009. — № 12. — С. 51–57.
- Однокопылов Г.И., Однокопылов И.Г. Повышение живучести частотно-регулируемого асинхронного электропривода // Из-

вестия Томского Политехнического университета. — 2005. — Т. 308. — № 7. — С. 143–148.

- Однокопылов Г.И., Брагин А.Д. Исследование в среде Matlab Simulink трехфазного асинхронного электропривода в аварийном двухфазном режиме работы // Технические науки — от теории к практике: Матер. XVI Междунар. заочной научно-практ. конф. — Новосибирск, 2012. — С. 125–130.

Поступила 01.02.2013 г.